

Тележенко Любов Миколаївна

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри технології ресторанного і оздоровчого харчування,

Одеський національний технологічний університет

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6675-2625>**Біленький Петро Костянтинівич**

аспірант кафедри технології ресторанного і оздоровчого харчування,

Одеський національний технологічний університет

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0143-9364>

СИНЕРГЕТИЧНИЙ ВПЛИВ ЛЕЦИТИНУ ТА СЛИЗУ ЛЬОНУ НА ПОКАЗНИКИ СТАБІЛЬНОСТІ ЕМУЛЬСІЙНИХ СИСТЕМ

Досліджено синергетичний стабілізуючий ефект соєвого лецитину та лляного слизу у складі рослинного емульсійного напою, призначеного для спортсменів. З'ясовано структурні та фізико-хімічні механізми, відповідальні за підвищення стабільності емульсії, солюбілізацію ліпофільних біологічно активних сполук та покращення функціональних характеристик матриці напою. Визначено, що завдяки своїй амфифільній природі соєвий лецитин ефективно знижує міжфазний натяг та сприяє утворенню дисперсних крапель емульсії типу «олія у воді», забезпечуючи ефективне включення ліпофільних пігментів, таких як ефірні олії куркуміну та імбиру. Розраховані параметри, включно гідрофільно-ліпофільний баланс та оптимальне співвідношення емульгатора та олії, підтверджують термодинамічну придатність системи для формування стабільної емульсії. Вияснено, що слиз лляного насіння має виражені гідроколоїдні властивості, утворюючи в'язку полісахаридну матрицю, яка обмежує коалесценцію, седиментацію і рухливість крапель. Встановлено, що взаємодія полісахаридів лляного насіння, ізоляту горохового білка і соєвого лецитину призводить до утворення багатошарових захисних оболонок навколо диспергованих ліпідних крапель, які складаються з внутрішнього шару, що адсорбує білок, проміжного гідроколоїдного та зовнішнього фосфоліпідного шарів. З'ясовано, що така багаторівнева структура значно підвищує стійкість емульсії до зсувних навантажень, коливань температури та процесів дестабілізації, пов'язаних із зберіганням, а наявність лецитину та слизу льону покращують рівномірність розподілу пігментів та підвищують біодоступність ліпофільних біоактивних речовин. Отримані результати підкреслюють потенціал комбінованих систем стабілізації білок-полісахарид-фосфоліпід для розробки спеціалізованих напоїв, призначених для спортсменів та людей з високою фізичною активністю, де стабільність, транспортування біологічно активних речовин та однорідність текстури є найважливішими показниками якості емульсійних напоїв.

Ключові слова: соєвий лецитин, слиз лляного насіння, ізолят горохового білку, стабільність емульсії, гідрофільно-ліпофільний баланс, солюбілізація, спортивне харчування.

Постановка проблеми та її актуальність. Емульсійні харчові продукти являють собою гетерогенні системи, у яких дисперсна фаза та дисперсійне середовище взаємно нерозчинні або обмежено розчинні рідини. У харчових емульсіях є можливість поєднувати в одній страві не змішувани рідини, збагачувати продукт одночасно гідрофільними і гідрофобними функціональними інгредієнтами, що підвищить їх біодоступність у організмі людини. В той же час, розроблення таких продуктів потребує ретельного вивчення технологічних процесів, так як емульсійні системи є нестабільними і можуть руйнуватись під впливом різних факторів, як то температура, наявність повітря та світла. Також емульсійні системи є сприятливим середовищем для розвитку мікроорганізмів, які у ході виробництва продуктів можуть його засіювати. Тривалість приготування може бути значною і потребує спеціальних

приймів та специфічного технологічного обладнання. Такі несприятливі фактори обумовлюють необхідність застосування емульгаторів для стабілізації дисперсної системи.

Критичним параметром у виробництві напоїв є стабільність емульсійних систем, для чого традиційно виробники використовують синтетичні або модифіковані емульгатори. Однак, зростаючий попит на натуральні інгредієнти, особливо при виготовленні напоїв для спортсменів, потребує переходу до природних поверхнево-активних речовин. Лецитин широко застосовується для різних емульсійних продуктів як природний емульгатор завдяки амфифільній структурі [4]. Проте його ефективність у напоях знижена через обмежену здатність формувати стійкі інтерфейсні шари, що утворюються на межі розділу фаз у гетерогенних системах, наприклад таких, як олія у воді та через низьку



в'язкість системи. В свою чергу, слиз льону характеризується високою водоутримуючою здатністю, утворенням в'язко-еластичної матриці та потенційною здатністю стабілізувати емульсії шляхом механічного уповільнення агрегації крапель.

Попри наявність даних щодо окремого використання лецитину або полісахаридних гідроколоїдів, синергетичні ефекти їх взаємодії в емульсійних напоях досліджені недостатньо. Залишається нез'ясованим, як комбінація лецитину та слизу льону впливає на гідрофільно-ліпофільний баланс (ГЛБ) системи, міжфазне напруження, солюбілізуючу здатність, формування мікро- та наноструктур, а також на довготривалу стабільність емульсій. Це ускладнює розроблення ефективних рецептур натуральних емульсійних продуктів, здатних замінити системи з використанням синтетичних стабілізаторів.

Поєднання лецитину та слизу льону може створювати синергетичні ефекти: зниження міжфазного натягу лецитином у поєднанні з утворенням полісахаридної тривимірної сітки, що уповільнює коалесценцію, кремування та флокуляцію. Однак механізми цього синергізму залишаються недостатньо визначеними, особливо в контексті ГЛБ-профілю та солюбілізації ліпофільних компонентів. Тому, проведення такого комплексного дослідження є актуальним для створення емульсійних напоїв функціонального призначення, зокрема для спортсменів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні тенденції розвитку харчових технологій характеризуються активним пошуком природних емульгаторів та стабілізаторів, що здатні забезпечувати високу технологічну ефективність. При цьому особливу увагу Jin Y., Adhikari A. приділяють комбінованим системам на основі білків, полісахаридів та фосфоліпідів, які демонструють синергетичний ефект щодо стабілізації емульсійних систем, а також контролю реологічних властивостей [5]. Liang L. et al. вказують, що лецитин ефективно знижує міжфазний натяг на межі «олія-вода», формує адсорбційний шар на поверхні крапель та забезпечує кінетичну стабільність емульсій завдяки амфифільній будові фосфатидилхоліну та споріднених фракцій [8]. Дослідження Yan J. et al. міжфазних характеристик показують, що включення лецитину до складу змішаних систем істотно зменшує міжфазний натяг і збільшує масу та товщину адсорбційного шару, що прямо корелює зі стабільністю емульсій та їх поведінкою під час травлення *in vitro* [12]. Venichou A. et al. спостерігаючи за емульсіями, стабілізованими лецитином у поєднанні з білковими компонентами, зокрема сироватковими протеїнами, підтвердили, що зміна складу міжфазної плівки та формування змішаних білково-фосфоліпідних шарів покращує стабільність до коалесценції [1]. Komaiko J. et al. вказують на ефективність соняшникового та соєвого лецитинів у створенні тонкодисперсних емульсій, призначених для інкапсуляції ω -3 поліненасичених жирних кислот [7]. Дослідження Navarrete de Toledo et al. демонструє,

що спонтанне впорядкування (самоасемблювання) лецитину та натрієвого казеїнату сприяє утворенню стабільних комплексів, які забезпечують менший розмір крапель та вищу стабільність емульсій, ніж окремі сполуки [9]. Puligundla P., Lim S. стверджують, що перспективним натуральним гідроколоїдом завдяки високій водоутримуючій здатності, плівкоутворювальним та загущувальним властивостям є слиз насіння льону, [10]. При оптимізації умов екстракції слизу льону (температура, тривалість, співвідношення «насіння-вода», рН середовища) Kishk Y. F. M. було виявлено тісний зв'язок між виходом муциляжу, реологічною поведінкою та емульгувальною активністю, що дозволило порівнювати його з такими камедами, як камедь гуару, ксантану, а також з альгінатом натрію [6]. Дослідження Quintana-Martinez S. et al. щодо систем «фосфоліпід-полісахарид» свідчать про синергетичний вплив лецитину та гідроколоїдів на стабільність емульсій [11].

Все вище викладене підкреслює наукову доцільність цілеспрямованого вивчення синергетичного впливу соєвого лецитину та слизу льону на ГЛБ, міжфазні, реологічні та структурні характеристики емульсійних систем, що й закладає підґрунтя для подальших експериментальних досліджень у рамках даної роботи.

Мета статті полягає у визначенні та кількісній оцінці синергетичного впливу лецитину та слизу льону на фізико-хімічні показники стабільності емульсійних систем, зокрема на гідрофільно-ліпофільний баланс (ГЛБ), солюбілізуючу здатність поверхнево-активних речовин, реологічні властивості та структурно-механічні характеристики емульсійного напою.

Для цього необхідно вирішити наступні **завдання**:

- проаналізувати сучасний науковий стан питання щодо використання соєвого лецитину та полісахаридних гідроколоїдів, зокрема слизу льону, як стабілізаторів та природних емульгаторів у харчових системах;
- оцінити гідрофільно-ліпофільний баланс (ГЛБ) інгредієнтів рецептурної композиції (лецитину, слизу льону);
- встановити оптимальне співвідношення слизу льону та лецитину, що забезпечить максимальну стабільність емульсії, найкращі показники ГЛБ та підвищену солюбілізацію ліпофільних компонентів.

Виклад основного матеріалу досліджень. На кафедрі технології ресторанного і оздоровчого харчування Одеського національного технологічного університету були проведені дослідження щодо синергетичного впливу лецитину та слизу льону на показники стабільності емульсійних систем, у т.ч. на стабільність емульсійного напою для спортсменів.

Сучасний розвиток харчових технологій характеризується зміщенням акцентів від синтетичних емульгаторів до природних поверхнево-активних речовин білкової, полісахаридної та фосфоліпідної природи, що зумовлено потребою підвищення харчової та біологічної цінності продуктів та напоїв.

Лецитин, що являє собою переважно суміш фосфоліпідів, збагачену фосфатидилхоліном, розглядається

як один із природних емульгаторів, дозволених до використання при виготовленні харчових продуктів. Його амфіфільна будова забезпечує адсорбцію на межі «олія-вода», зниження міжфазного натягу та формування адсорбційного шару, що перешкоджає коалесценції крапель.

Одним із перспективних напрямів при виготовленні емульсійних продуктів є формування змішаних комплексів лецитину з білками.

Відомо, що полісахариди можуть утворювати інтерфейсні комплекси з білками і тим самим підсилювати стабілізуючу дію білкових емульгаторів. Такі білково-полісахаридні комплекси здатні формувати товстіші, механічно стійкіші міжфазні шари, зменшувати швидкість окиснювального пошкодження інкапсульованих ліпідів та підвищувати ефективність мікрокапсулювання ω -3 жирних кислот та інших чутливих компонентів [2].

Отже, полісахаридні гідроколоїди в харчових емульсіях виконують переважно функції стабілізаторів структури, доповнюючи дію емульгаторів, зокрема лецитину.

Такий гетерополісахаридний комплекс як слиз льону, що виділяється із зовнішніх шарів насіння *Linum usitatissimum L.*, містить як нейтральні арабіно-кислянові фракції, так і кислі рафінозоподібні структури.

Оглядаючи методи екстракції та харчового застосування лляного слизу, відзначається його висока водотримуюча здатність, виражені піноутворювальні та емульгувальні властивості, а також його здатність до формування в'язко-еластичної структури з характерною псевдопластичною поведінкою. Їх дослідження продемонстрували перспективність використання слизу льону у складі колоїдних систем, зокрема подвійних емульсій для доставки жиророзчинних нутрієнтів. Такі системи характеризуються покращеною стабільністю під час зберігання та потенційно вищою біодоступністю вітамінів і ω -3 жирних кислот.

Сучасні концепції комбінованих систем в емульсіях передбачають поєднання маломолекулярних емульгаторів, яким є лецитин, із такими полімерними стабілізаторами, як білки та полісахариди. Саме такі системи дозволяють розділити функції наступним чином: лецитин швидко адсорбується та знижує міжфазний натяг, а полісахариди формують у безперервній фазі тривимірну

сітку, яка механічно ускладнює зближення крапель, а в окремих випадках може частково адсорбуватися на інтерфейсі, посилюючи сферичну стабілізацію [3].

Оскільки числовою характеристикою, яка описує наскільки система схиляється до гідрофільності (водорозчинності) або до ліпофільності (розчинності в оліях), є гідрофільно-ліпофільний баланс (ГЛБ), у роботі було досліджено цей показник для передтренувального спортивного напою.

Для емульсій типу О/В (олія у воді) бажаний ГЛБ лежить у межах 8–16, залежно від кількості жирів.

У таблиці 1 приведені характеристики гідрофільності та ліпофільності компонентів напою.

З даних таблиці видно, що розроблений передтренувальний напій майже повністю водний, а жирна фаза дуже мала, але є гідрофобні компоненти – такі як фосфоліпіди лецитину, ліпіди насіння льону, ефірні олії імбиру та куркумін.

Розроблений напій має дві ключові гідрофобні фракції: ліпіди льону – вміст жиру у льоні 35–40%, у 5 г льону міститься 1,8–2,0 г жирної фази та ліпофільні фітокомпоненти – куркумін (0,3 г як ліпофільна матриця) та імбирні ефірні олії (2–3% від маси імбиру становлять 0,05–0,06 г). Сумарна жирова та ліпофільна фракції становлять приблизно 2,1–2,2 г. Для емульгування 2,2 г жирної фази потрібний ГЛБ емульгатора близько 10–12 ум. од. для утримання дрібних гідрофобних глобул у водній системі.

При комплексній оцінці ГЛБ системи було визначено, що соєвий лецитин (4–5 г) має ГЛБ 4–9 (залежно від типу фосфоліпідів), але білки з ГЛБ ізоляту горохового білку 8–10, полісахариди льону з ГЛБ 12–14 та водні компоненти зсувають загальний системний баланс у бік гідрофільності. Тому, умовний ГЛБ всього напою лежить у межах 11–13 одиниць, а це означає, що напій добре формує емульсію типу «олія у воді», лецитин, що входить до складу напою ефективно солубілізує куркумін та ефірні олії, а слиз льону підсилює стабілізацію глобул, що подовжує стабільність напою до 48 год. Структура досліджуваного напою залишається рівномірною без розшарування.

Для систем з низьким вмістом жиру, але високим вмістом гідроколоїдів (слиз льону, білок гороху) оптимальним є діапазон: $E/O = 1,5-2,5$. Розроблений

Таблиця 1 – Характеристика та орієнтовні значення ГЛБ рецептурних інгредієнтів напою

Компонент	Характеристика	Орієнтовний ГЛБ
Відвар кіноа	Водний розчин полісахаридів	18 (дуже гідрофільний)
Кокосова вода	Електроліти, вода	18
Мед	Розчин цукрів	16–18
Слиз льону (гель)	Гідроколоїди-протеоглікани	12–14 (амфіфільний)
Ізолят горохового білку	Амфіфільний білок	8–10
Соєвий лецитин	Емульгатор	4–9
Куркума (куркумін)	Ліпофільний пігмент	3–5
Імбир (ефірні олії)	Ліпофільні ароматичні сполуки	3–5
Лимонний сік	Органічні кислоти	18

Джерело: сформовано авторами

напій знаходиться всередині цього діапазону, тобто лецитину достатньо для утворення тонких оболонок навколо ліпофільних глобул, а «надлишок» лецитину працює як солубілізатор пігментів (куркумін, олія імбиру), що покращує колір та біодоступність даного продукту.

Модель ГЛБ системи як сума п'яти функціональних блоків із умовними ГЛБ та часткою в системі представлена у таблиці 2.

Таблиця 2 – Функціональні блоки напою з умовними ГЛБ та часткою в системі

Блок	Умовний ГЛБ	Частка в системі (ω)
Водна фаза (відвар кіноа, кокосова вода, мед, лимон)	18	0,60
Слиз льону (гель)	13	0,10
Ізолят горохового білку	9	0,15
Соевий лецитин	7	0,10
Ліпофільні пігменти (куркума, імбир, ліпіди льону)	4	0,05

Джерело: сформовано авторами

З метою наукового обґрунтування складу передтренувального напою для спортсменів було проведено дослідження, результати якого демонструють, яким чином відбувається формування адсорбційного шару, тобто як лецитин, в якості основного амфіфільного компоненту, знижує міжфазний натяг, тоді як білок гороху створює структурно-механічний бар'єр на поверхні жирових частинок, а також, як проходить стабілізація напою завдяки використанню гідроколоїду – слизу льону, що підвищує в'язкість дисперсійного середовища, зміщуючи загальний ГЛБ системи в бік вищої гідрофільності, що критично для напоїв типу О/В (рис. 1).

На рис. 1 показано блоки, що входять до рецептури напою з їх ГЛБ. Пунктирна горизонтальна лінія вказує

на сукупний ГЛБ системи та дорівнює 14,3 ум. од. Отримана модель свідчить про те, що водна фаза й слиз льону спрямовують систему в зону високих гідрофільних значень, лецитин та ліпофільні пігменти знижують ГЛБ, але не змінюють загальну гідрофільну природу, тому система природно налаштована під О/В-тип. Значення 14,3 ум. од. означає, що у напої спостерігається висока спорідненість до водної фази, комфортна зона для солубілізації дрібної кількості ліпофільних пігментів та добра стабільність емульсійних напоїв, яка лежить у межах, характерних для типових напоїв з ГЛБ 10-16 ум. од.

З метою встановлення оптимальної концентрації поверхнево-активних речовин для забезпечення агрегативної стійкості системи було проведено дослідження залежності стабільності емульсії від співвідношення Е/О. Це дозволяє мінімізувати міжфазний натяг і запобігти коалесценції жирових глобул, гарантуючи рівномірний розподіл енергетичних компонентів та їх високу біодоступність для організму спортсмена. Отримані дані слугують базою для прогнозування термінів зберігання напою та оптимізації його органолептичних показників.

Проведено дослідження залежності стабільності розробленого емульсійного напою від співвідношення емульгатор/жирова фаза (Е/О). Отримані дані наведені на рис. 2.

На рис. 2 за максимально можливу стабільність прийнято 1,0. Якщо $E/O < 1,0$, це свідчить про нестачу емульгатора, краплі жиру злипаються і має місце високе розшарування. У випадку, коли E/O дорівнює 1,5-2,0 має місце зона максимальної стабільності, для якої характерними є дрібні глобули жиру, добре солубілізовані ліпофільні пігменти, і крім того, система стабілізована ще й слизом льону та білком гороху. Якщо E/O більше ніж 2,5-3,0, виникає надлишок емульгатора, при цьому зростає в'язкість, можливі міцелярні структури

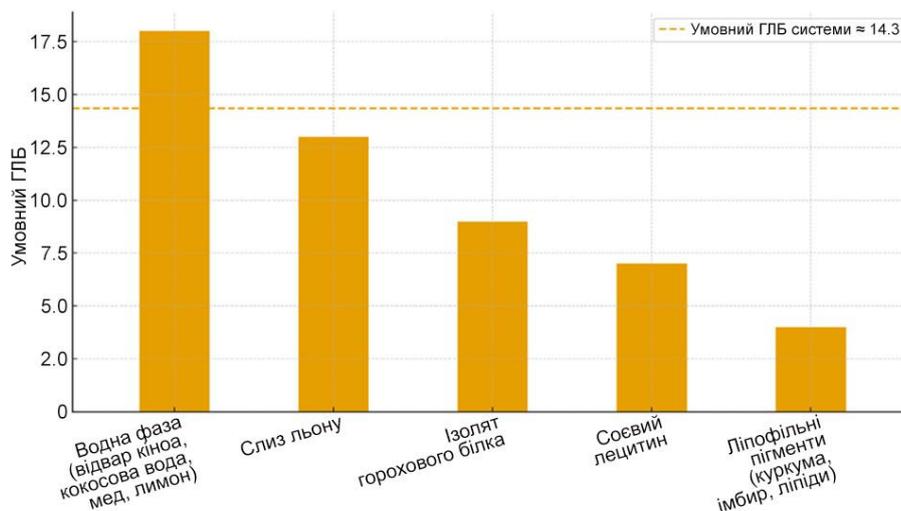


Рисунок 1 – Графічна модель ГЛБ системи емульсійного передтренувального напою

Джерело: сформовано авторами

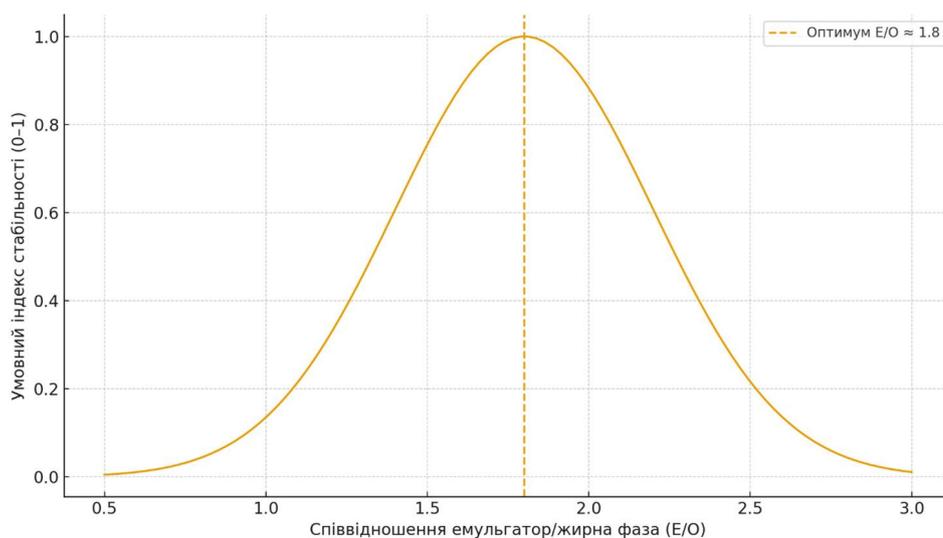


Рисунок 2 – Залежність стабільності емульсійного напою від співвідношення E/O

Джерело: сформовано авторами

«поза ціллю», а стабільність системи вже майже не підвищується. Пунктирна вертикальна лінія показує, що для розробленого напою із 4 г лецитину на 2,2 г жирної фази співвідношення E/O становить 1,8. Тому, вибрана в якості рецептурного інгредієнту напою маса соєвого лецитину 4 г обґрунтовано лежить у зоні максимуму стабільності.

Проведені органолептичні дослідження показали, що після зберігання розробленого емульсійного напою протягом 24 годин при температурі 4оС, структура його була стабільною, розшарування не спостерігалось.

Висновки. Проведене дослідження встановило, що поєднання соєвого лецитину та слизу льону у складі передтренивального емульсійного напою на рослинній основі виявляє виражений синергетичний ефект щодо підвищення фізико-хімічної стабільності емульсійної системи. Визначено, що лецитин, завдяки амфифільній природі та здатності знижувати міжфазний натяг,

забезпечує формування стабільних глобул емульсії типу «олія у воді» та ефективно солюбілізує ліпофільні біоактивні компоненти, зокрема куркумін та ефірні олії імбиру. Слиз льону, у свою чергу, завдяки високій водотримуючій здатності та структуроутворюючим властивостям, формує в'язку полісахаридну матрицю, що уповільнює коалесценцію та седиментаційні процеси. Синергетичний ефект взаємодії лецитину та слизу льону проявляється у значному підвищенні стабільності напою, збереженні однорідної консистенції, а також у покращенні рівномірності розподілу ліпофільних біоактивних компонентів. Отримані результати свідчать про перспективність використання комбінованих білково-полісахаридно-фосфоліпідних систем природного походження для конструювання стабільних емульсійних напоїв функціонального призначення, зокрема для спортсменів та осіб з високою фізичною активністю.

Список використаних джерел:

1. Benichou A., Aserin A., Garti N. Protein-Polysaccharide Interactions for Stabilization of Food Emulsions. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2002. Vol. 23, no. 1–3. P. 93–123. DOI: <https://doi.org/10.1080/01932690208984192>
2. Du Q., Zhou L., Li M., Lyu F., Liu J., Ding Y. Omega-3 polyunsaturated fatty acid encapsulation system: Physical and oxidative stability, and medical applications. *Food Frontiers*. 2022. Vol. 3, no. 1. P. 28–45. DOI: <https://doi.org/10.1002/fft2.134>
3. Garti N., Reichman D. Hydrocolloids as Food Emulsifiers and Stabilizers. *Food Structure*. 1993. Vol. 12, no. 4. Article number: 3. P. 411–426.
4. Ishii T., Matsumiya K., Aoshima M., Matsumura Y. Microgelation imparts emulsifying ability to surface-inactive polysaccharides-bottom-up vs top-down approaches. *NPJ Science of Food*. 2018. Vol. 2. Article number: 15. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41538-018-0023-7>
5. Jin Y., Adhikari A. Recent Developments and Applications of Food-Based Emulsifiers from Plant and Animal Sources. *Colloids and Interfaces*. 2025. Vol. 9, no. 5. P. 61. DOI: <https://doi.org/10.3390/colloids9050061>
6. Kishk Y. F. M. Optimization of flaxseed mucilage extraction and its functional characteristics. *Annals of Agriculture Science Moshtohor*. 2004. Vol. 42, no. 3. P. 1177–1197.
7. Komaiko J., Sastrosubroto A., McClements D. J. Encapsulation of ω -3 fatty acids in nanoemulsion-based delivery systems fabricated from natural emulsifiers: Sunflower phospholipids. *Food chemistry*. 2016. Vol. 203. P. 331–339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.080>

8. Liang L., Chen F., Wang X., Jin Q., Decker E. A., McClements D. J. Physical and oxidative stability of flaxseed oil-in-water emulsions fabricated from sunflower lecithins: Impact of blending lecithins with different phospholipid profiles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017. Vol. 65, No. 23. P. 4755–4765. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01469>
9. Navarrete de Toledo A. M., Franco Picone C. S., Kawazoe Sato A. C. Lecithin-sodium caseinate self-assembled complexes as emulsifying agents in oil-in-water emulsion: Acidic medium approach. *Current research in food science*. 2022. Vol. 5. P. 958–963.
10. Puligundla P., Lim S. A Review of Extraction Techniques and Food Applications of Flaxseed Mucilage. *Foods*. 2022. Vol. 11, no. 12. P. 1677. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11121677>
11. Quintana-Martinez S., Morales-Cano A., García-Zapateiro L. Rheological behaviour in the interaction of lecithin and guar gum for oil-in-water emulsions. *Czech Journal of Food Sciences*. 2018. Vol. 36. no. 1. P. 73–80.
12. Yan J., Yang Z., Qiao X., Kong Z., Dai L., Wu J., Xu X., McClements D. J. Interfacial characteristics and in vitro digestion of emulsion coated by single or mixed natural emulsifiers: Lecithin and/or rice glutelin hydrolysates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2022. Vol. 102, No. 7. P. 2990–2999. – DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11639>

References:

1. Benichou, A., Aserin, A., & Garti, N. (2002). Protein-polysaccharide interactions for stabilization of food emulsions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, no. 23 (1–3), pp. 93–123. DOI: <https://doi.org/10.1080/01932690208984192>
2. Du, Q., Zhou, L., Li, M., Lyu, F., Liu, J., & Ding, Y. (2022). Omega-3 polyunsaturated fatty acid encapsulation system: Physical and oxidative stability, and medical applications. *Food Frontiers*, no. 3 (1), pp. 28–45. DOI: <https://doi.org/10.1002/fft2.134>
3. Garti, N., & Reichman, D. (1993). Hydrocolloids as food emulsifiers and stabilizers. *Food Structure*, no. 12 (4), Article 3, pp. 411–426.
4. Ishii, T., Matsumiya, K., Aoshima, M., & Matsumura, Y. (2018). Microgelation imparts emulsifying ability to surface-inactive polysaccharides-bottom-up vs top-down approaches. *NPJ science of food*, no. 2, Article 15. <https://doi.org/10.1038/s41538-018-0023-7>
5. Jin, Y., & Adhikari, A. (2025). Recent developments and applications of food-based emulsifiers from plant and animal sources. *Colloids and Interfaces*, no. 9 (5), p. 61. DOI: <https://doi.org/10.3390/colloids9050061>
6. Kishk, Y. F. M. (2004). Optimization of flaxseed mucilage extraction and its functional characteristics. *Annals of Agriculture Science Moshtohor*, no. 42 (3), pp. 1177–1197.
7. Komaiko, J., Sastrosubroto, A., & McClements, D. J. (2016). Encapsulation of ω -3 fatty acids in nanoemulsion-based delivery systems fabricated from natural emulsifiers: Sunflower phospholipids. *Food Chemistry*, no. 203, pp. 331–339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.080>
8. Liang, L., Chen, F., Wang, X., Jin, Q., Decker, E. A., & McClements, D. J. (2017). Physical and oxidative stability of flaxseed oil-in-water emulsions fabricated from sunflower lecithins: Impact of blending lecithins with different phospholipid profiles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, no. 65 (23), pp. 4755–4765. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01469>
9. Navarrete de Toledo, A. M., Franco Picone, C. S., & Kawazoe Sato, A. C. (2022). Lecithin-sodium caseinate self-assembled complexes as emulsifying agents in oil-in-water emulsion: Acidic medium approach. *Current Research in Food Science*, no. 5, pp. 958–963.
10. Puligundla, P., & Lim, S. (2022). A review of extraction techniques and food applications of flaxseed mucilage. *Foods*, no. 11 (12), p. 1677. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11121677>
11. Quintana-Martinez, S., Morales-Cano, A., & García-Zapateiro, L. (2018). Rheological behaviour in the interaction of lecithin and guar gum for oil-in-water emulsions. *Czech Journal of Food Sciences*, no. 36 (1), pp. 73–80.
12. Yan, J., Yang, Z., Qiao, X., Kong, Z., Dai, L., Wu, J., Xu, X., & McClements, D. J. (2022). Interfacial characteristics and in vitro digestion of emulsion coated by single or mixed natural emulsifiers: Lecithin and/or rice glutelin hydrolysates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, no. 102 (7), pp. 2990–2999. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11639>

Liubov Telezhenko, Petro Bilenkyi
Odesa National University of Technology

SYNERGISTIC EFFECT OF LECITHIN AND FLAXSEED MUCILAGE ON THE STABILITY INDICES OF EMULSION SYSTEMS

The synergetic stabilizing effect of soy lecithin and flaxseed mucilage within a plant-based emulsion beverage designed for athletes was investigated. The structural and physicochemical mechanisms responsible for enhancing emulsion stability, solubilizing lipophilic bioactive compounds, and improving the functional characteristics of the beverage matrix were elucidated. It was determined that, due to its amphiphilic nature, soy lecithin effectively reduces interfacial tension and promotes the formation of dispersed oil-in-water (O/W) emulsion droplets, ensuring efficient incorporation of lipophilic pigments such as curcumin and ginger essential oils. Calculated parameters, including the hydrophilic-lipophilic balance (HLB) and the optimal emulsifier-to-oil ratio, confirm the thermodynamic suitability of the system for forming a stable emulsion. It was found that flaxseed mucilage possesses pronounced hydrocolloid properties, forming a viscous polysaccharide matrix that restricts droplet coalescence, sedimentation, and mobility. The

study established that the interaction between flaxseed polysaccharides, pea protein isolate, and soy lecithin leads to the formation of multilayer protective coatings around the dispersed lipid droplets, consisting of an inner protein-adsorbing layer, an intermediate hydrocolloid layer, and an outer phospholipid layer. It was clarified that such a multilevel structure significantly increases emulsion resistance to shear stress, temperature fluctuations, and storage-related destabilization processes. Furthermore, the presence of lecithin and flaxseed mucilage improves the uniformity of pigment distribution and enhances the bioavailability of lipophilic bioactive substances. The results highlight the potential of combined protein-polysaccharide-phospholipid stabilization systems for developing structurally stable functional beverages with targeted nutrient delivery. This is particularly relevant for the formulation of specialized drinks for athletes and individuals with high physical activity, where stability, transport of bioactive substances, and texture uniformity are critical quality indicators for emulsion-based beverages.

Keywords: soy lecithin, flaxseed mucilage, pea protein isolate, emulsion stability, hydrophilic-lipophilic balance, solubilization, sports nutrition.

Дата надходження статті: 14.01.2026

Дата прийняття статті: 19.02.2026

Дата публікації статті: 18.03.2026